

地铁车辆段车致振动测试及楼板振动放大研究*

陈兆玮¹, 彭 淞¹, 朱胜阳², 曾得峰³, 徐 鸿⁴, 尹 镪⁴

(1. 重庆交通大学机电与车辆工程学院 重庆, 400074)

(2. 西南交通大学轨道交通运载系统全国重点实验室 成都, 610031)

(3. 中铁二院重庆勘察设计研究院有限责任公司 重庆, 401147)

(4. 中铁二院工程集团有限责任公司 成都, 610036)

摘要 为研究地铁车致车辆段振动特性, 评估振动对车辆段的影响。首先, 依托重庆某大型车辆段上盖物业项目, 重点采集钢轨、轨枕(咽喉区)、检修坑立柱(停车区)、建筑承重柱以及上盖楼板等处的振动加速度, 借助经验公式对上盖建筑的二次结构噪声进行预测; 其次, 基于板壳振动理论建立承重柱-楼板系统振动模型, 研究上盖楼板振动放大特性, 揭示振动放大机理。研究表明: 咽喉区整体振动水平大于停车区; 振动从钢轨传播到承重柱的过程中, 1.25~200 Hz 的振动明显衰减; 上盖楼板由于振动叠加效应出现振动放大现象; 二次噪声主要集中在 50~200 Hz; 不同频率的振动波致使楼板的局部振动放大, 且振动叠加最大位置与波长以及列车驶过相邻 2 个承重柱的时间之间存在定量数学关系。研究结果可为地铁上盖物业振动及二次噪声控制提供参考。

关键词 地铁车辆段; 振动测试; 低频振动; 二次噪声; 上盖建筑

中图分类号 TH113; U211.3

0 引 言

城市土地资源紧张推动了车辆段上盖物业的发展, 其在提高土地利用效率的同时, 也可反哺地铁建设与运营^[1]。然而, 地铁运行振动经轨道、道床和车辆段结构传至上盖平台, 在结构耦合作用下引发上盖建筑振动及二次结构噪声^[2]。相关研究表明, 地铁诱发的建筑振动与二次噪声卓越频率多为低频, 且一般不超过 80 Hz^[3-5], 长期暴露在此环境下可能影响居民生活与健康^[6-7]。同时, 大型车辆段具有线路多、轨道支撑形式复杂、道岔数量多等特点, 振动传播规律更为复杂。因此, 有必要开展大型车辆段车致振动及二次噪声测试研究, 为上盖物业开发和减振降噪设计提供依据。

目前, 已有学者采用不同方法对车辆段和上盖建筑振动及二次噪声问题进行了深入研究。陈艳明等^[8-9]测试了下沉式车辆段咽喉区与列检库的振动特性。冯青松等^[10-12]通过实测和有限元方法, 分析了扣件刚度与振源激励对上盖建筑的影响。谢伟平等^[13-14]建立了弱振精细化模型, 研究了多阻尼

橡胶支座的减振降噪效果。汪益敏等^[15-17]测试了试车线及直线电机车辆段, 分析了横纵向振动传播规律。万灵等^[18]基于运营地铁隧道的在线动力监测数据, 分析了地铁运行引起的隧道结构动力响应及时频特征。邹超等^[19-21]基于阻抗理论构建了预测模型, 研究了不同速度下水平和垂直向的振动传播。以上工作多围绕不同工况、不同减振措施下的车辆段上盖振动噪声预测开展研究, 缺少针对复杂结构大型车辆段的深入研究, 且对车辆段特征结构间的振动传播规律分析不够充分。

本研究依托重庆四公里车辆段上盖物业项目, 针对车辆段的咽喉区、停车区、上盖区与咽喉区旁的敏感区开展振动测试。同时, 采用经验公式预测二次噪声。以加速度、振级和声压级为指标, 评估地铁运行对车辆段和敏感区域的影响, 研究振动及二次噪声传播特性。在此基础上, 基于板壳振动理论构建承重柱-楼板振动系统研究上盖楼板振动放大现象, 揭示振动放大机理, 构建振动叠加位置与波速、频率和承重柱间距之间的函数关系。

* 国家自然科学基金资助项目(52008067); 重庆市自然科学基金资助项目(CSTB2022NSCQ-MSX1193); 重庆市教育委员会科学技术研究资助项目(KJZD-M202300701)

收稿日期: 2023-12-04; 修回日期: 2024-06-14

1 工程概况

四公里车辆段位于重庆市南岸区并紧邻海峡路,负责重庆轨道交通环线地铁的检修、停放保养、调节编组、整备等工作。车辆段内有 16 条停车列检线、2 条月检线、1 条工程车线、1 条内燃车线、1 条材料棚线和 1 条洗车线。车辆段内停放的地铁车辆为 6 编组 As 型地铁列车,其单节车长约 19 m,车宽约 3 m,轴重约 15 t,最大运营速度可达 100 km/h。

四公里上盖物业项目规划建设 29 栋建筑,其中咽喉区上方规划 14 栋办公楼,停车区上方规划 12 栋高层住宅和 1 栋幼儿园,咽喉区旁规划 2 栋高层建筑。项目概况和四公里车辆段如图 1 所示。

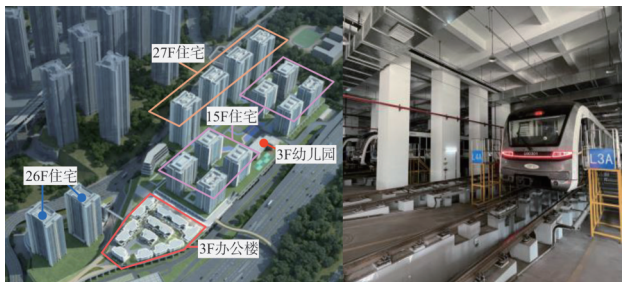


图 1 项目概况和四公里车辆段
Fig.1 Overview of project and Sigongli metro depot

2 车辆段振动测试

为确保测试结果的可靠性,在 11 号股道线路共开展 20 趟列车出入库的振动测试。测试车辆为 6 编组 As 型地铁列车,测试时列车模拟日常出入车辆段,运行速度约为 10 km/h,在通过库内安全通道时列车需停车鸣笛。列车运行工况与测点布置如图 2 所示。

振动测试共布置 14 个测点,分别为:①咽喉区(截面 1)的钢轨、轨枕、建筑承重柱和上盖楼板振动测点;②停车区(截面 2、3)的钢轨、检修坑立柱、建筑承重柱和上盖楼板振动测点;③咽喉区旁敏感区(测点 4、5)。现场测试照片如图 3 所示。采用低频振动加速度传感器测取不同测点的垂向加速度。对于钢轨上的测点,先将磁性底座吸附在轨底上表面并拧紧传感器,再通过电缆连接采集仪与计算机;先在轨枕和支撑柱测点粘贴方形金属片,再将磁座吸附其上并安装传感器,且保持与钢轨水平相距 0.3 m;承重柱测点需将直角三角柱的直角面贴于柱身并使另一面水平,磁座吸附后安装传感器,使其距地面 0.3 m;上盖平台测点安装方法与支撑柱相同;针对土体表面测点,则先将金属棒插入土中约 0.2 m 并调至垂直,再将磁座吸附于棒顶横截面安装传感器。测试仪器参数如表 1 所示。

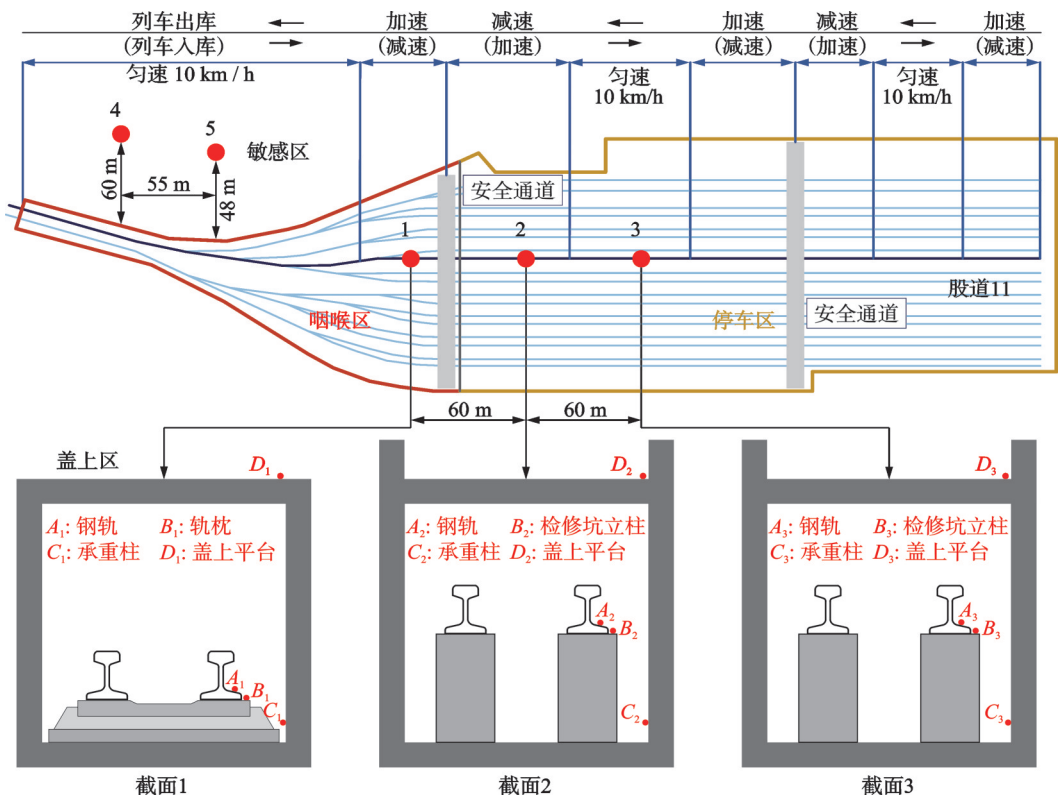


图 2 列车运行工况与测点布置
Fig.2 Train operating conditions and layout of measuring points

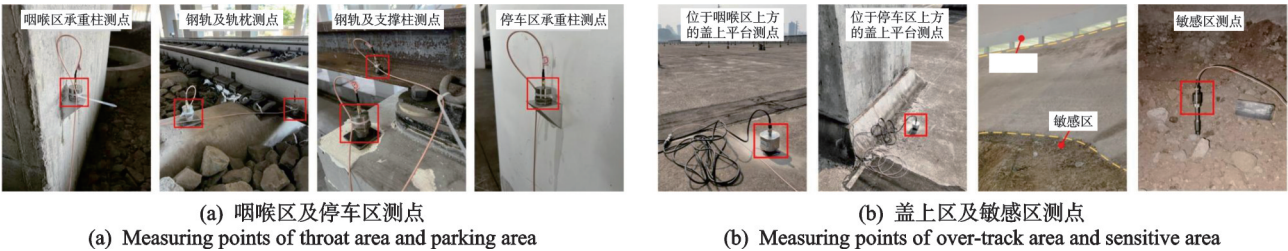


图3 现场测试照片
Fig.3 Photos of field-testing

表 1 测试仪器参数

Tab.1 Parameters of testing instruments					
仪器型号	INV9822	LC0106T	LC0132T	CT11000L	INV3062SC
	振动传感器	振动传感器	振动传感器	振动传感器	信号采集仪
电荷灵敏度/($\text{mV}\cdot\text{g}^{-1}$)	100	1 000	50 000	10 000	
频率范围/Hz	0.2~8 000	0.05~1 500	0.05~500	0.2~500	
横向灵敏度/%			≤ 5		功能:将振动信号转化为电信号
采样频率/Hz		2 048		1 000	
布置位点	钢轨	检修坑立柱、承重柱	盖上台	土体表层	

3 振动特性

本研究依据《城市区域环境振动标准》(GB 10070—88)^[22]对不同测点的最大 z 振级(maximum z-vibration level, 简称 VL_{zmax})开展评估,分频振级依据《城市轨道交通引起建筑物振动与二次辐射噪声限值及其测量方法标准》(JGJ/T 170—2009)^[23]进行评估。四公里上盖项目属于居住商业混合区,该区域规定 VL_{zmax} 容许值为:昼间 75 dB、夜间 72 dB,相应分频振级容许值为:昼间 70 dB、夜间 76 dB。

3.1 车辆段振动特性

列车运行时,轮轨振动经轨枕/检修坑立柱、承

重柱传至盖上台,因此本研究重点分析 3 个截面的垂向振动传播特性。截面 1 垂向振动传播特性如图 4 所示,列车通过咽喉区时,轮对与辙叉心轨尖端撞击导致各结构加速度出现瞬时增大。该截面各测点卓越频率有所差异,但主要集中在 40~63 Hz。振动在钢轨至轨枕的传播过程中,8~200 Hz 频段振动衰减明显,最大衰减 17.6 dB;振动在轨枕至承重柱传播过程中,1.25~200 Hz 频段振动均有衰减,最大衰减 19.6 dB。振动在承重柱至盖上台传播时,振动水平总体相近,局部频段存在放大现象。

截面 1 中各测点的峰值加速度(peak particle acceleration, 简称 PPA)与 VL_{zmax} 如图 5 所示,振动在前

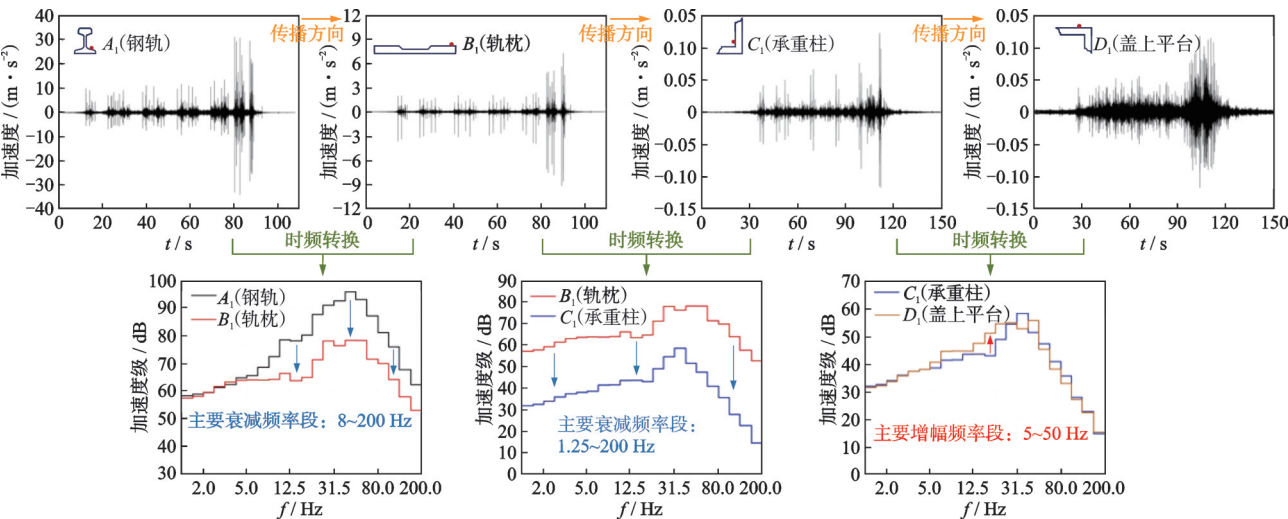
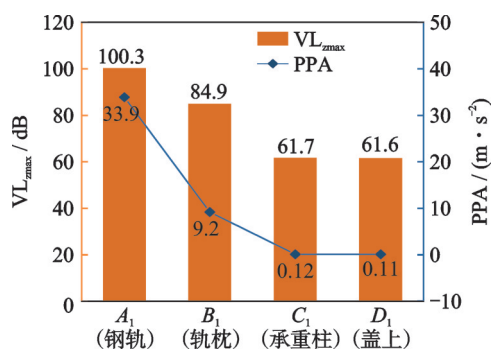


图4 截面1垂向振动传播特性
Fig.4 Vertical vibration propagation characteristics of section 1

图5 截面1测点PPA与VL_{zmax}Fig.5 PPA and VL_{zmax} of measuring point of section 1

3个结构之间传播时,PPA分别衰减3.7倍和76.7倍,VL_{zmax}分别减小15%和27%,但承重柱与盖上平台

的PPA与VL_{zmax}值相近。这表明振动在钢轨到承重柱传播过程中,振动随着与钢轨距离的增加而显著衰减,但承重柱与盖上平台的振动水平无明显差别。

停车区截面2的振动传播特性如图6所示。受列车停车鸣笛影响,加速度信号在时域中出现中断现象。该截面钢轨、检修坑立柱、承重柱与盖上平台的卓越频率分别为50、100、40和50 Hz。振动在钢轨至检修坑立柱、检修坑立柱至承重柱传播过程中,1.25~200 Hz频段振动均明显衰减,最大衰减量分别为22.9、20.2 dB;振动在承重柱至盖上平台传播时出现振动放大,且放大频段较截面1更宽,最大增幅为8 dB。

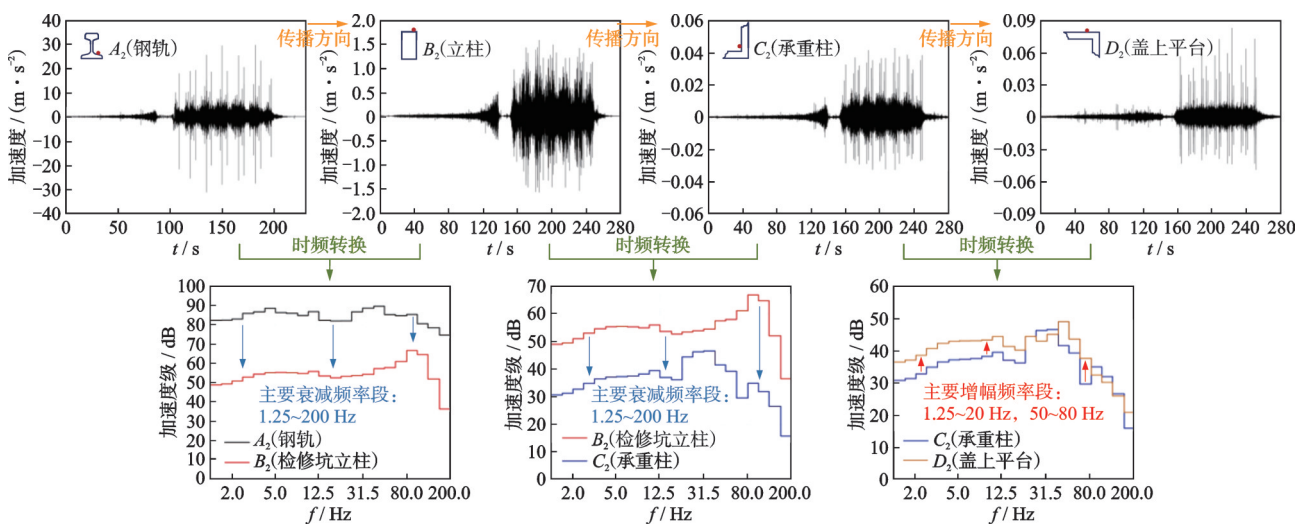
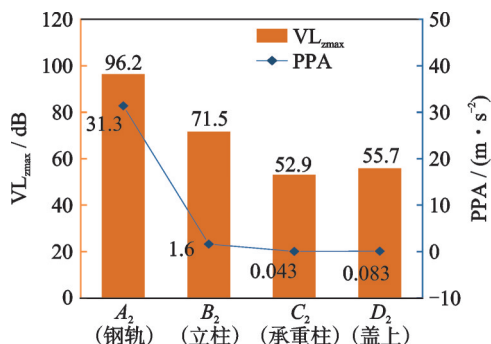


图6 截面2垂向振动传播特性

Fig.6 Vertical vibration propagation characteristics of section 2

截面2测点PPA与VL_{zmax}如图7所示,振动在前3个结构之间传播时,截面2与截面1的振动变化趋势相近。PPA分别衰减19.6倍和37.2倍,VL_{zmax}分别减小25%和26%。但相比两截面的盖上平台振动,D₂测点增幅明显,其相较于C₂测点的PPA增大1.9倍,VL_{zmax}增幅5%。

图7 截面2测点PPA与VL_{zmax}Fig.7 PPA and VL_{zmax} of measuring points of section 2

截面3垂向振动传播特性如图8所示。受列车停车鸣笛影响,时域加速度信号同样出现中断。该截面各测点卓越频率集中在31.5~100 Hz。与截面2相似,振动在钢轨至检修坑立柱、检修坑立柱至承重柱传播过程中,1.25~200 Hz频段振动明显衰减,最大衰减量分别为21 dB和22.6 dB;振动在承重柱至盖上平台传播时,在1.25~16 Hz频段振动衰减,最大减小10.8 dB,而在20~200 Hz频段振动放大,最大增幅为15.8 dB。

图9为截面3测点PPA与VL_{zmax},与图7比较可知,停车区截面2、3的振动水平与变化趋势相近。振动在前2个传播过程中,PPA分别衰减23.2倍和34.2倍,VL_{zmax}分别减小25%和31%。最终盖上平台的PPA与VL_{zmax}较承重柱分别提高2倍和9%。

在3个截面的频域图中,当振动从承重柱向传播至上盖平台时,可以发现不同位置平台振动放大

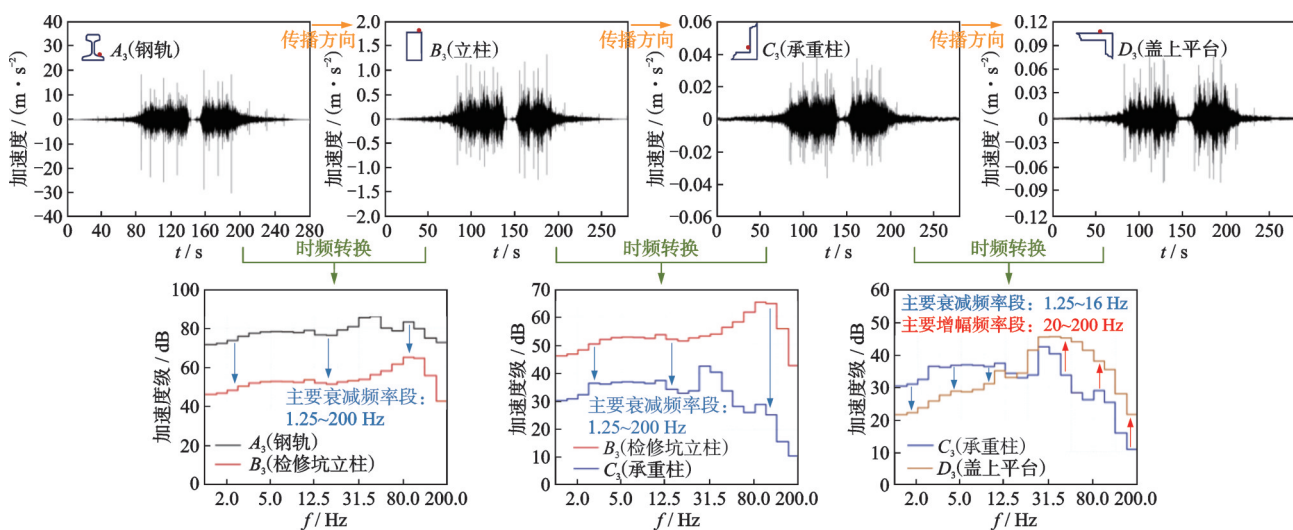
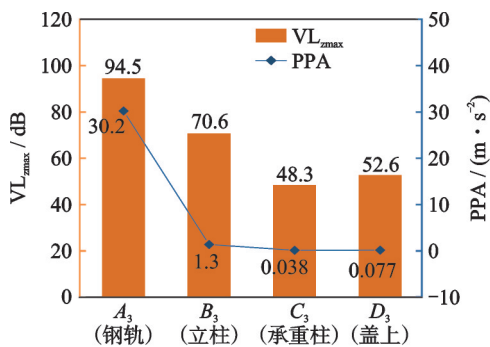


图8 截面3垂向振动传播特性

Fig.8 Vertical vibration propagation characteristics of section 3

图9 截面3测点PPA与 VL_{zmax} Fig.9 PPA and VL_{zmax} of measuring point of section 3

的频带不同。这是由于列车在车辆段内并非匀速运行,速度的差异引起轮轨力的变化,进而使得振动波在车辆段结构中传播时的幅值和相位不同,最终导致某些频率的振动波叠加位置发生变化。

3.2 敏感区振动特性

敏感区域测点4、5对应图1中位于车辆段咽喉区旁的高层建筑位置。敏感区域振动加速度见图10,可以看出,由于测点5距离咽喉区更近,其加速度峰值为 0.013 m/s^2 ,略大于测点4的 0.011 m/s^2 。图11为1/3倍频,即测点4、5的分频振级。由于两测点所属同一地块且距离相近,可以明显看出分频振级变化趋势相似。两测点卓越频率均为50 Hz, VL_{zmax} 分别为47.5、45.3 dB,均未超过限值。

车辆段测点振动结果如表2所示,通过横向和纵向对比分析,可以得出以下结论:

1) 由于列车通过咽喉区时轮对与辙叉心轨尖端发生撞击引起振动冲击,导致咽喉区整体振动水平大于停车区。

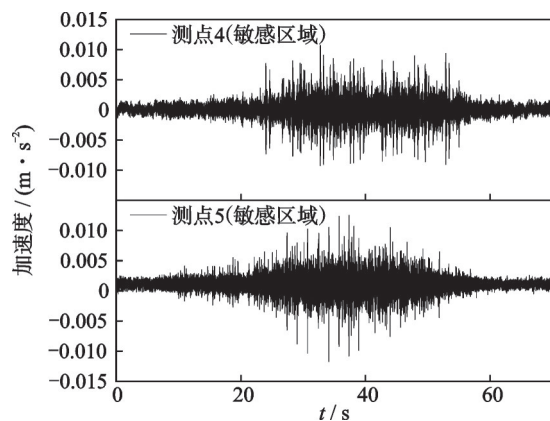


图10 敏感区域振动加速度

Fig.10 Vibration acceleration of sensitive area

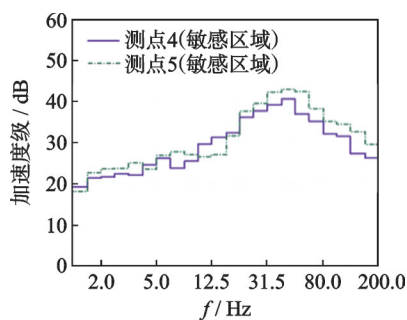


图11 1/3倍频

Fig.11 1/3 octave frequency

2) 在振动从钢轨到承重柱的传播过程中,振动随距离的增加而发生不同程度衰减,但传播至上盖平台时存在放大现象,导致上盖平台振动水平大于承重柱。

3) 在所有测点中,仅 A_1 、 A_2 、 A_3 和 B_1 测点的振动超过标准限值,其余测点振动水平均在标准限值以下。

表 2 车辆段测点振动结果

Tab.2 Vibration results of measuring points on metro depot

测点	PPA/(m·s ⁻²)	最大振级/dB	VL _{zmax} /dB
A ₁ (钢轨)	33.9	95.9	100.3
A ₂ (钢轨)	31.3	89.7	96.2
A ₃ (钢轨)	30.2	86.1	94.5
B ₁ (轨枕)	9.2	78.3	84.9
B ₂ (立柱)	1.6	66.8	71.5
B ₃ (立柱)	1.3	65.1	70.6
C ₁ (承重柱)	0.12	58.7	61.7
C ₂ (承重柱)	0.043	46.6	52.9
C ₃ (承重柱)	0.038	42.5	48.3
D ₁ (盖上)	0.11	56.1	61.6
D ₂ (盖上)	0.083	49.2	55.7
D ₃ (盖上)	0.077	45.6	52.6

3.3 振动分析

为探明盖上平台振动放大原因,对测点 D_1 、 D_2 和 D_3 进行相关性分析,评估咽喉区轮对与辙叉心轨尖端撞击对后部结构的影响。选取列车通过咽喉区时振动最大时段的加速度信号进行对比,相关性分析结果如图 12 所示。 D_1 测点自相关度为 12.4, D_2 、

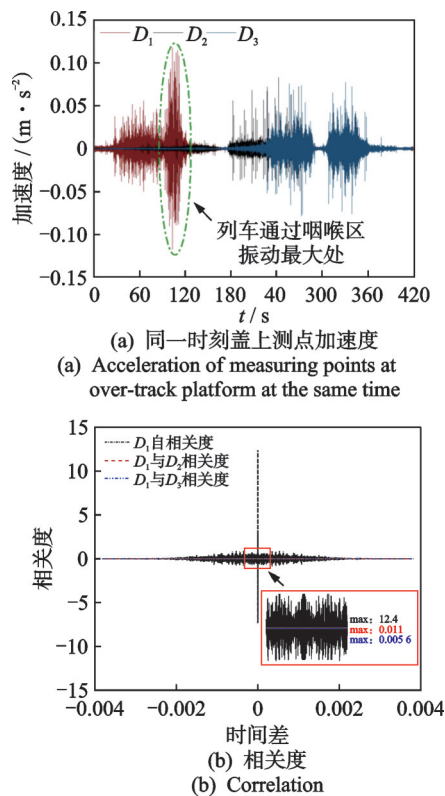


图 12 相关性分析

Fig.12 Correlation analysis

D_3 测点的相关度分别仅为 0.011、0.005 6,表明咽喉区振动冲击对后部结构影响较小,盖上平台振动放大并非由岔区振动纵向传递引起。考虑到列车运行会使相邻承重柱同时振动,其振动传至上盖楼板后可能发生叠加,因此盖上平台振动放大可能与楼板内振动叠加效应有关。

4 上盖楼板振动放大机理

为深入研究上盖楼板振动叠加放大现象,基于弹性薄板振动理论^[24]构建承重柱-楼板系统力学模型,承重柱-楼板振动系统如图 13 所示。将楼板视为弹性薄板,承重柱视为刚度阻尼支撑且上部与楼板相连接,底部弹性支撑等效地基的刚度阻尼,且上部与承重柱底部相连接。

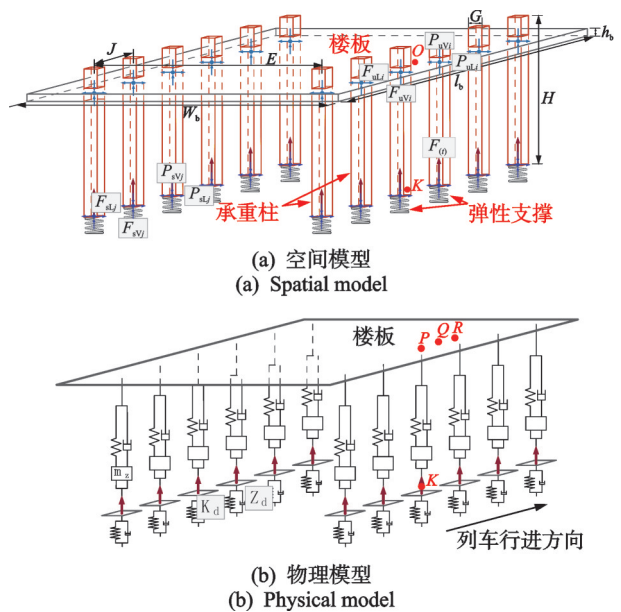


图 13 承重柱-楼板振动系统

Fig.13 Bearing column-floor vibration system

图 13 中: P_{uVi} 与 P_{uLi} 分别为楼板与承重柱节点的垂向力与横向力; F_{uVi} 与 F_{uLi} 分别为承重柱顶部支撑点的垂向反力与横向反力; P_{sVj} 与 P_{sLj} 分别为承重柱底部的垂向力与横向力; F_{sVj} 与 F_{sLj} 分别为弹性支撑的垂向反力与横向反力; $F_{(i)}$ 为施加于承重柱底部的简谐激励,简谐激励方程为

$$F_{(i)} = \sin(2\pi f_i t)$$
 (1)

其中: $f_i = 1.25, 1.6, 2, \dots$, 为 1~200 Hz 内 1/3 倍频程中心频率,简谐激励沿列车行进方向在相邻两承重柱之间以时间间隔 t_0 依次加载。

W_b 、 l_b 、 h_b 分别为楼板宽度、长度与厚度,振动系统参数如表 3 所示。

表 3 振动系统参数	
Tab.3 Parameters of vibration system	
参数	数值
楼板宽度 W_b/m	12
楼板长度 l_b/m	21
楼板厚度 h_b/m	0.6
列车驶经两承重柱时间 t_0/s	0.7
承重柱横向间距 E/m	6
承重柱纵向间距 J/m	3
承重柱长度、宽度 G/m	1.2
承重柱高度 H/m	9
承重柱质量 m_s/kg	32 400
承重柱弹性模量/MPa	3.6×10^4
楼板弹性模量/MPa	2.8×10^4
承重柱与楼板泊松比	0.2
承重柱密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	2.5
楼板密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	2.4
弹性支撑等效刚度 $K_d/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	1×10^9
弹性支撑等效阻尼 $Z_d/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1})$	0.03

根据弹性薄板振动理论建立楼板振动方程,采用分离变量法将楼板挠度表示为空间振型函数与时间广义坐标的乘积展开形式。利用振型函数的正交性对控制方程进行模态投影,从而将偏微分形式的楼板振动方程降阶为有限维动力方程。最后,采用 Newmark- β 隐式积分法对方程进行求解,具体可参见笔者已发表文献^[4]。

基于上述振动系统,重点讨论不同频率简谐激励条件下楼板的振动响应。楼板与承重柱的观察点分别为点 O 、点 Q 、点 R 和点 K ,其中点 O 位于邻近承重柱位置处的楼板上(与上文测点 D_1 、 D_2 、 D_3 对应),点 K 位于承重柱底部(与上文测点 C_1 、 C_2 、 C_3 对应),点 Q 和点 R 为楼板上另外 2 个沿列车行进方向布置的观察点,楼板上 3 个测点等间距布置(见图 13)。

在该振动系统中,10、20、31.5、63 Hz 简谐激励下的 O 点振动均出现不同程度放大,承重柱-楼板振动响应如图 14 所示,振动加速度幅值分别增大 13%、43%、71% 和 45%。当上述简谐波传播至 Q 点和 R 点时,仅 Q 点在 10 Hz、 R 点在 20 Hz 激励下出现放大。根据波叠加原理,波峰或波谷重合时振动放大,波峰与波谷相遇时振动削弱。因此, O 点位于上述 4 种频率激励的叠加放大区域,而 Q 点和 R 点仅在部分频率下处于放大区域。

经上述分析可知,在某些条件下振动会因叠加效应而发生放大现象。为探明楼板振动叠加最大位置与相关因素的关系,建立两列简谐波函数并进行分析,振动叠加放大示意图如图 15 所示。

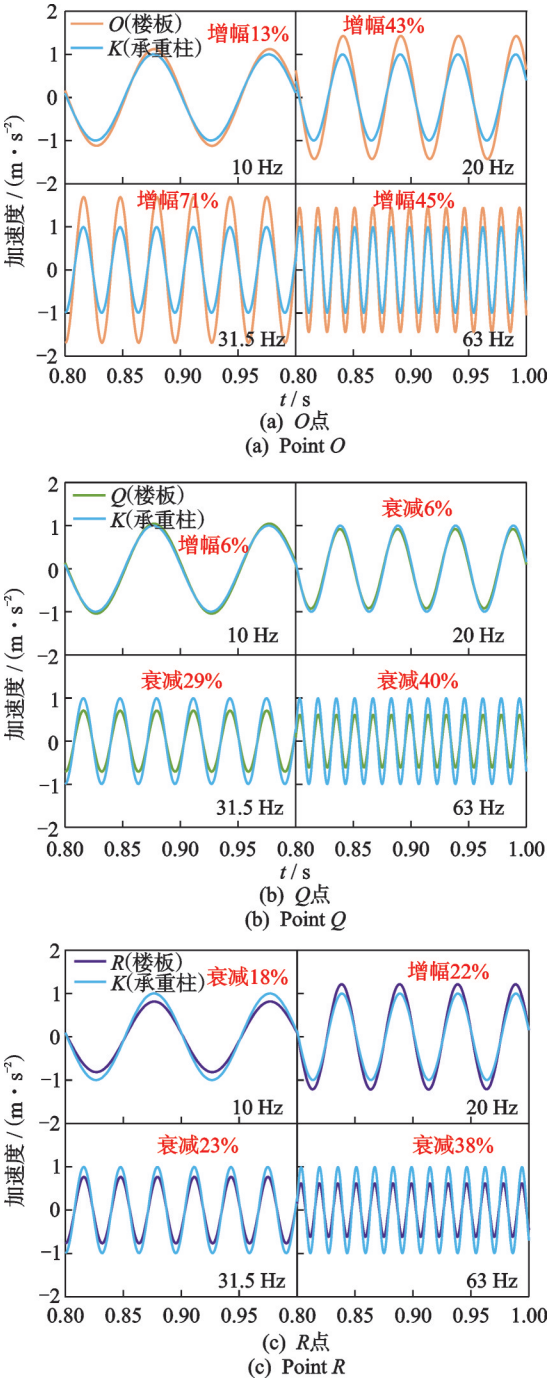


图 14 承重柱-楼板振动响应
Fig.14 Bearing column-floor vibration response

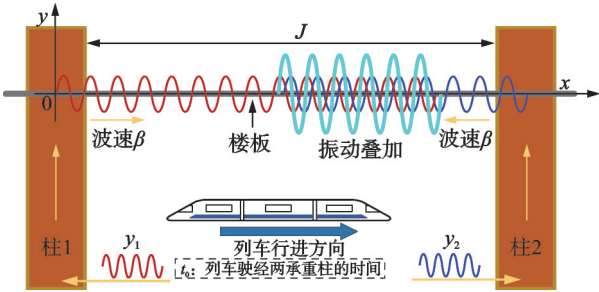


图 15 振动叠加放大示意图
Fig.15 Diagram of vibration superposition amplification

列车自左向右行进, y_1 为传播至柱1的简谐波, y_2 为经时间 t_0 后传播至柱2的简谐波。以柱1与楼板的交点为坐标原点, 柱1垂向方向为 y 轴, 楼板平行方向为 x 轴, 定义两简谐波表达式分别为

$$\begin{cases} y_1 = I \sin \left[\omega(t + t_0) - \frac{2\pi}{\lambda} x \right] \\ y_2 = I \sin \left[\omega(t) + \frac{2\pi}{\lambda} (x + J) \right] \end{cases} \quad (2)$$

其中: I 为幅值; ω 为频率; λ 为波长; t_0 为列车驶经相邻两承重柱之间的时间; J 为两柱间距离。

进一步基于波的叠加原理, 合成波 y_c 的表达式为

$$y_c = 2I \cos \left(\frac{\omega t_0}{2} - \frac{2\pi x}{\lambda} - \frac{\pi J}{\lambda} \right) \sin \left[\omega t + \left(\frac{\omega t_0}{2} + \frac{\pi J}{\lambda} \right) \right] \quad (3)$$

由式(3)可以看出, 叠加波的振幅只与 x 轴位置有关。因此根据下式可最终得到位于楼板上的所有振动最大位置, 即

$$\begin{cases} \frac{\omega t_0}{2} - \frac{2\pi x}{\lambda} - \frac{\pi J}{\lambda} = k\pi \\ \lambda = \beta / f \\ \omega = 2\pi f \end{cases} \quad (4)$$

$$x_{\max} = \frac{\beta t_0}{2} - \frac{J}{2} - \frac{k\beta}{2f} \quad (5)$$

其中: $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$; β 为波速; f 为频率。

需要说明的是, 上述结果为理想简谐波叠加条件下的理论最大位置。在实际工程中, 振动传播会受结构阻尼衰减及其他方向波动干扰, 因此本研究所得叠加最大位置可作为快速定位楼板振动放大区域和制定减振措施的参考。

5 上盖建筑二次噪声预测

本研究采用标准《环境影响评价技术导则—城市轨道交通》(HJ 453—2018)^[25] 中室内二次结构噪声经验公式将盖上3个测点分频振级转化为分频声压级和总声压级, 用于评估列车引起的盖上二次结构噪声。1/3倍频程声压级 $S_{p,i}$ (16~200 Hz) 预测计算公式为

$$S_{p,i} = S_{v,\text{mid},i} + 10\lg\sigma - 10\lg H - 20 + 10\lg T_{60} \quad (6)$$

其中: $S_{v,\text{mid},i}$ 为单列车通过时段的建筑物室内楼板中央垂向1/3倍频程振动速度级(16~200 Hz), 单位为 dB; $i = 1, 2, \dots, 12$, 为第 i 个1/3倍频程; σ 为声辐射效率; H 为结构平均高度, 单位为 m; T_{60} 为室内混响时间, 单位为 s。

根据《城市轨道交通引起建筑物振动与二次辐

射噪声限值及其测量方法标准》(JGJ/T 170—2009)^[23] 将四公里上盖项目归于居住商业混合区, 二次结构噪声容许值为: 昼间 41 dB(A)、夜间 38 dB(A)。本研究重点关注上盖二次结构噪声, 经 A 计权后上盖测点声压级如图 16 所示。可以看出, 二次噪声卓越频率主要集中在 50~200 Hz, 50 Hz 以下的二次噪声能量较低。

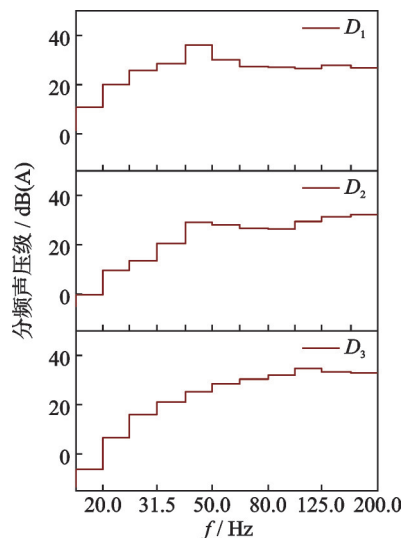


图16 上盖测点声压级

Fig.16 Sound pressure level of the over-track measuring point

表4为盖上平台各测点总声压级, 3个测点均存在二次结构噪声超标情况, 但超标量较小。因此, 该地铁车辆段上盖项目需采取减振降噪效果适中的措施, 如可在咽喉区轨道下方铺设减振垫、停车区的普通扣件更换为弹性扣件、在上盖建筑底部设置隔振支座等。

表4 盖上测点总声压级

Tab.4 Overall sound pressure level of the over-track measuring points

测点	总声压级	超出值
D_1	39.5	1.5
D_2	38.1	0.1
D_3	40.4	2.4

6 结 论

1) 列车通过咽喉区时轮对与辙叉心轨尖端撞击引起的振动冲击致使咽喉区整体振动水平大于停车区。振动最大处位于钢轨, VL_{zmax} 为 100.3 dB, 振动最小处位于承重柱, VL_{zmax} 为 48.3 dB。

2) 从钢轨到承重柱的传播过程中,振动随与钢轨距离的增加而衰减,1.25~200 Hz 频段内的振动衰减明显。上盖平台振动存在放大现象, VL_{zmax} 增幅最高为 4.3 dB。盖上平台及敏感区域振动未超过标准限值。

3) 针对盖上平台测点,二次噪声主要集中在 50~200 Hz,最大声压级均存在微量超标情况,超标量在 0.1~2.4 dB(A),建议采用弹性扣件、隔振支座等减振降噪措施。

4) 针对本研究结构参数,通过构建承重柱-楼板振动系统,发现 10、20、31.5 和 63 Hz 的简谐激励使得临近承重柱位置的楼板振动有不同程度放大,且振动叠加最大位置与波速、频率和承重柱间距存在定量关系。

参 考 文 献

- [1] 俞洁, 杨晓光, 尹瑞, 等. 基于 TOD 模式的成长型城市公共交通运输规划[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(3): 106-110.
YU Jie, YANG Xiaoguang, YIN Rui, et al. Public transport planning of developing city based on TOD mode[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(3): 106-110.(in Chinese)
- [2] 邹超, 冯青松, 何卫. 列车运行引起地铁车辆段与上盖建筑环境振动研究综述[J]. 交通运输工程学报, 2023, 23(1): 27-46.
ZOU Chao, FENG Qingsong, HE Wei. Research review on environmental vibrations in metro depot and over-track buildings induced by train operation[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2023, 23(1): 27-46.(in Chinese)
- [3] 陈兆玮, 徐鸿, 尹镭, 等. 地铁诱发 TOD 建筑群振动及二次噪声控制[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2023, 51(7): 63-68.
CHEN Zhaowei, XU Hong, YIN Qiang, et al. Control of metro-induced vibration and secondary noise of TOD building group[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2023, 51(7): 63-68.(in Chinese)
- [4] CHEN Z W, PENG S, ZENG D F, et al. Basement design for vibration reduction of high-rise buildings under metro operation[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2023, 27(4): 1732-1750.
- [5] 陈兆玮, 徐鸿, 尹镭, 等. 地铁运行引发临近建筑群低频微振动及传递规律研究[J]. 振动工程学报, 2023, 36(6): 1623-1632.
CHEN Zhaowei, XU Hong, YIN Qiang, et al. Low-frequency microvibration and its transfer law of nearby building group caused by running metro train[J]. Journal of Vibration Engineering, 2023, 36(6): 1623-1632.(in Chinese)
- [6] 崔高航, 陶夏新, 陈宪麦. 城轨交通引起的环境振动问题综述研究[J]. 地震工程与工程振动, 2008, 28(1): 38-43.
CUI Gaochang, TAO Xiaxin, CHEN Xianmai. Studies on environmental vibration induced by urban rail transit[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 28(1): 38-43.(in Chinese)
- [7] 刘维宁, 马蒙, 刘卫丰, 等. 我国城市轨道交通环境振动影响的研究现状[J]. 中国科学(技术科学), 2016, 46(6): 547-559.
LIU Weining, MA Meng, LIU Weifeng, et al. Overview on current research of environmental vibration influence induced by urban mass transit in China[J]. Scientia Sinica Technologica, 2016, 46(6): 547-559.(in Chinese)
- [8] 陈艳明, 冯青松, 刘庆杰, 等. 下沉式地铁车辆段咽喉区车致振动特性[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(3): 51-60.
CHEN Yanming, FENG Qingsong, LIU Qingjie, et al. Train-induced vibration characteristics in throat area of sinking metro depot[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(3): 51-60.(in Chinese)
- [9] 陈艳明, 冯青松, 刘庆杰, 等. 下沉式地铁车辆段列检库车致振动实测与分析[J]. 振动、测试与诊断, 2021, 41(3): 532-538.
CHEN Yanming, FENG Qingsong, LIU Qingjie, et al. Test and analysis of vibration induced by train operation in sinking metro depot service shop[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2021, 41(3): 532-538.(in Chinese)
- [10] 冯青松, 王子玉, 刘全民, 等. 地铁车辆段不同区域振动特性对比分析[J]. 振动与冲击, 2020, 39(14): 179-185, 200.
FENG Qingsong, WANG ZI Yu, LIU Quanmin, et al. Comparative analysis of environmental vibration characteristics in different regions of a metro depot[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(14): 179-185, 200.(in Chinese)
- [11] 冯青松, 江焯, 成功, 等. 库内线不同减振扣件刚度组合对双层车辆段上盖建筑振动噪声影响研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(9): 3320-3330.
FENG Qingsong, JIANG Xuan, CHENG Gong, et al. Influence of different stiffness combinations of damping fasteners on vibration and noise of upper building of dou-

- ble-deck depot excited by garage inner track[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(9): 3320-3330. (in Chinese)
- [12] 冯青松, 王子玉, 刘全民, 等. 双振源激励下地铁车辆段上盖建筑物振动特性[J]. 交通运输工程学报, 2019, 19(4): 59-69.
FENG Qingsong, WANG ZI Yu, LIU Quanmin, et al. Vibration characteristics of metro depot upper building under double vibration source excitation[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2019, 19(4): 59-69. (in Chinese)
- [13] 谢伟平, 王政印, 孙亮明. 地铁车辆段新型隔振支座的减振效果研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(10): 63-70, 93.
XIE Weiping, WANG Zhengyin, SUN Liangming. Vibration reduction effect of a new isolation bearing for a metro depot[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(10): 63-70, 93. (in Chinese)
- [14] 谢伟平, 陈艳明, 姚春桥. 地铁车辆段上盖物业车致振动分析[J]. 振动与冲击, 2016, 35(8): 110-115.
XIE Weiping, CHEN Yanming, YAO Chunqiao. Vibration analysis of train depot over-track buildings induced by train load[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(8): 110-115. (in Chinese)
- [15] 汪益敏, 陶子渝, 邹超, 等. 地铁车辆段咽喉区上盖建筑振动传播规律[J]. 交通运输工程学报, 2022, 22(1): 112-121.
WANG Yimin, TAO Ziyu, ZOU Chao, et al. Vibration propagation law within over-track buildings above throat area of metro depot[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2022, 22(1): 112-121. (in Chinese)
- [16] 汪益敏, 曾泽民, 邹超, 等. 地铁车辆段试车线列车振动影响的试验研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2014, 42(12): 1-8.
WANG Yimin, ZENG Zemin, ZOU Chao, et al. Experimental investigation into train-induced vibrations of test-line at metro depot[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2014, 42(12): 1-8. (in Chinese)
- [17] 汪益敏, 刘品言, 陶子渝, 等. 地铁车辆段直线电机列车车致振动的试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(9): 2436-2443.
WANG Yimin, LIU Pinyan, TAO Ziyu, et al. Test study on vibration induced by linear motor trains in a metro depot[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(9): 2436-2443. (in Chinese)
- [18] 万灵, 黄强, 龚晓南, 等. 运营地铁隧道在线动力监测及时频特征分析[J]. 振动、测试与诊断, 2024, 44(2): 372-379.
WAN Ling, HUANG Qiang, GONG Xiaonan, et al. Time-frequency characteristics of online dynamic monitoring of operating metro tunnel[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2024, 44(2): 372-379. (in Chinese)
- [19] 邹超, 陈颖, 胡子豪, 等. 地铁车辆段不同区域车致上盖建筑振动传播规律研究[J]. 噪声与振动控制, 2022, 42(6): 181-186.
ZOU Chao, CHEN Ying, HU Zihao, et al. Train-induced vibration transmission within over-track buildings in different areas of metro depot[J]. Noise and Vibration Control, 2022, 42(6): 181-186. (in Chinese)
- [20] 邹超, 陈颖, 陶子渝, 等. 地铁车辆段上盖建筑水平向振动特性与预测方法研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(7): 282-289.
ZOU Chao, CHEN Ying, TAO Ziyu, et al. Characteristics and prediction method of train-induced horizontal vibration transmission within over-track building of metro depot[J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(7): 282-289. (in Chinese)
- [21] 邹超, 汪益敏, 汪朝晖, 等. 地铁车辆段咽喉区地面振动传播规律实测与分析[J]. 振动与冲击, 2015, 34(16): 200-206.
ZOU Chao, WANG Yimin, WANG Chaohui, et al. Field measurement and analysis of ground vibration in the throat area of metro depot[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(16): 200-206. (in Chinese)
- [22] 国家环境保护局. GB 10070—1988 城市区域环境振动标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1989.
- [23] 住房和城乡建设部. JGJ/T 170—2009 城市轨道交通引起建筑物振动与二次辐射噪声限值及其测量方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [24] 曹志远. 板壳振动理论[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1989: 36-39.
- [25] 生态环境部. HJ 453—2018 环境影响评价技术导则城市轨道交通[S]. 北京: 中国环境出版社, 2019.



第一作者简介:陈兆玮,男,1988年8月生,博士、教授。主要研究方向为车辆-轨道耦合动力学。曾发表《地铁运行引发临近建筑群低频微振动及传递规律研究》(《振动工程学报》2023年第36卷第6期)等论文。

E-mail:chenzhaowei_cq@163.com

通信作者简介:彭淞,男,1999年3月生,硕士生。主要研究方向为轨道交通诱发环境振动及控制。

E-mail:pengsong_cq@163.com